



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

HEAT TREATMENT OF ALUMINUM ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Adami

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Němec, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Martin Adami**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Karel Němec, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Tepelné zpracování slitin hliníku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu o tepelném zpracování slitin hliníku používaných ve strojírenském průmyslu a následné vyhodnocení výhod a nevýhod různých způsobů tepelného zpracování u vybraných slitin.

Cíle bakalářské práce:

Zpracování přehledu slitin hliníku.

Popis způsobů tepelného zpracování těchto slitin.

Posouzení vhodnosti použití tepelného zpracování u vybraných slitin hliníku.

Seznam doporučené literatury:

PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

MICHNA, Štefan. Encyklopedie hliníku. Děčín, Alcan Děčín Extrusions, 2005. 1. elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 80-89041-88-4.

SEDLÁČEK, Vladimír. Neželezné kovy a slitiny. 1.vyd., Praha, SNTL, 1979. 398 s.

SEDLÁČEK, Vladimír. Únava hliníkových a titanových slitin. 1.vyd., Praha, SNTL, 1989. 351 s.

ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá popisem jednotlivých hliníkových slitin, využíváním ve strojírenství a jejich tepelným zpracováním. V první části se zaměřuje na technicky čistý hliník, ve které popisuje jeho výrobu. Dále se zaměřuje na rozdělení hliníkových slitin dle schopnosti precipitačního vytvrzování.

Klíčová slova: hliník, hliníkové slitiny, tepelné zpracování, žíhání

Abstract

This bachelor theses deals with description aluminium alloys, theirs applications in engineering and theirs heat treatment. First part is focused on pure aluminium and its production. The other one is about distribution aluminium alloys by possibility of precipitation hardening.

Key word: aluminium, aluminium alloys, heat treatment, annealing

Bibliografická citace

ADAMI, M. Tepelné zpracování slitin hliníku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Tepelné zpracování slitin hliníku* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu použitých zdrojů.

Martin Adami

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval při psaní této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Hliník	12
2.1	Výroba hliníku	12
2.1.1	Výroba oxidu hlinitého z bauxitu	12
2.1.2	Výroba hliníku elektrolýzou	12
2.1.3	Alternativní metody výroby	13
2.2	Vlastnosti hliníku	14
2.2.1	Fyzikální vlastnosti	14
2.2.2	Chemické vlastnosti	14
2.2.3	Mechanické vlastnosti	14
2.3	Aplikace hliníku	15
3	Slitiny hliníku	16
3.1	Označení slitin hliníku dle ČSN EN	16
3.2	Rozdělení slitin	17
3.3	Přehled tvářených nevytvrditelných hliníkových slitin	18
3.3.1	Hliník technické čistoty (skupina 1xxx)	18
3.3.2	Slitiny Al-Mn (skupina 3xxx)	19
3.3.3	Slitiny Al-Mg (skupina 5xxx)	19
3.4	Přehled tvářených vytvrditelných hliníkových slitin	19
3.4.1	Slitiny Al-Cu (skupina 2xxx)	20
3.4.2	Slitiny Al-Mg-Si (skupina 6xxx)	20
3.4.3	Slitiny Al-Zn (skupina 7xxx)	21
3.4.4	Slitiny Al-Si (skupina 4xxx)	21
3.4.5	Další slitiny hliníku (skupiny 8xxx)	21
3.5	Slévárenské slitiny hliníku	22
3.5.1	Slévárenské slitiny typu Al-Si (silumin)	23
3.5.2	Slévárenské slitiny typu Al-Cu (dural)	24
3.5.3	Slévárenské slitiny typu Al-Mg (hydronalium)	25
3.5.4	Slévárenské slitiny typu Al-Zn	25
4	Tepelné zpracování slitin hliníku	26
4.1	Přehled žíhacích procesů	26
4.2	Vytvrzování – precipitační zpevnění	29
4.3	Tepelné zpracování vybraných slitin hliníku	33

4.3.1	Slitina EN AW-7075	33
4.3.2	Slitina EN AW-3103	33
5	Závěr	34
6	Seznam použitých zdrojů	35
7	Seznam použitých zkratk a symbolů	38
8	Příloha	39
8.1	Označování stavů tepelného zpracování hliníku a jeho slitin.....	39

1 ÚVOD

Hliník se stal pro člověka v mnohých odvětvích neodmyslitelným pomocníkem. Setkává se s ním na denním pořádku. Přestože se neočekává, že by se vývoj hliníku posunul výrazněji dopředu, své místo, především v oblastech automobilového a leteckého průmyslu, má minimálně na pár let své místo pořád jisté. V technicky čistém stavu se díky dobré vodivosti a odolnosti vůči korozi se využívá v elektrotechnice. Největší zastoupení má však v podobě slitin.

Zájem o tento materiál také ukazuje tabulka celosvětová produkce, která se stále zvyšuje.



Graf 1.1 Produkce hliníku v letech 2000–2018 [1]

2 HLINÍK

2.1 Výroba hliníku

Navzdory velkému zastoupení hliníku v zemské kůře se výroba datuje až od konce padesátých let 19. století. V přírodě se vyskytuje v podobě stovek různých minerálů a hornin. Nejvýznamnější ekonomicky využitelnou surovinou pro výrobu je bauxit¹. Celkový proces se může zjednodušit na dvě etapy. První z nich je příprava čistého oxidu hlinitého z hlinitanových rud. Druhá pak elektrolytická výroba hliníku [2, 3]

2.1.1 Výroba oxidu hlinitého z bauxitu

V současné době se v celosvětovém měřítku nejvíce využívá tzv. Bayerova metoda výroby oxidu hlinitého, kterou vynalezl v 90. letech 19. století rakouský chemik Karl Josef Bayer. Vstupní surovinou je kvalitní bauxit s malým množstvím oxidu křemičitého. Hlavní kroky Bayerova procesu jsou: [2, 4]

- drcení a mletí bauxitu
- loužení připraveného bauxitu s hydroxidem sodným (NaOH) za zvýšené teploty² (140–280 °C) a tlaku za vzniku hlinitanového roztoku
- separace hlinitanového roztoku od červeného kalu³ – oddělování oxidu hlinitého od oxidů železa i dalších sloučenin křemíku, titanu atd.
- precipitace⁴ – vznik čistého hydroxidu hlinitého
- srážení hydroxidu hlinitého z hlinitanového roztoku
- oddělování vysráženého hydroxidu hlinitého z přesyceného roztoku
- filtrace, sušení a kalcinace⁵

2.1.2 Výroba hliníku elektrolýzou

Naprostá většina primárního hliníku se vyrábí tzv. Hall-Héroultovou metodou. Jedná se o elektrolýzu roztavené směsi oxidu hlinitého (též zvaného alumina) a kryolitu⁶. Poprvé byla tato metoda patentována v roce 1886 nezávisle na sobě Američanem Charlesem Hallem a Francouzem Paulem Héroultem. Tento způsob se až na malé odlišnosti praktikuje dodnes. Celý děj probíhá v elektrolyzních pecích, tzv. elektrolýzerech [2, 5].

Oxid hlinitý má vysokou teplotu tání (± 2040 °C) a je špatný elektrický vodič. Klíč k úspěšné výrobě hliníku spočívá v elektrolytu, který se skládá z roztaveného kryolitu (80–90 %) ve kterém je rozpuštěný oxid hlinitý (2–8 %). Zbytek je tvořen přísadami, nejčastěji fluorid vápenatý (CaF_2) a fluorid hlinitý (AlF_3). Tyto látky způsobují snížení bodu tavení kryolitu, z původních 1010 °C na 920–970 °C, což má za následek zlepšení účinnosti elektrolýzy a nižší náklady na výrobu [2, 6].

¹ hornina tvořena směsicí minerálů s vysokým obsahem oxidu hlinitého – Al_2O_3

² závisí na složení bauxitu

³ odpadní produkt obsahující především nerozpustný oxid železitý (červené zbarvení)

⁴ přidáním krystalových zárodků hydroxidu hlinitého $\text{Al}(\text{OH})_3$ jako očkovač

⁵ žíhání při teplotě 900–1200 °C k dehydrataci hydroxidu hlinitého za vzniku bezvodého oxidu hlinitého

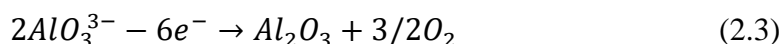
⁶ hexafluorohlinitan trisodný – Na_3AlF_6

Elektrolyzátor bývá obvykle pravoúhlá ocelová vana. Katodu tvoří uhlíková výzdívka elektrolyzátoru. Průchodem elektrického proudu, který je umožněn vnořenými uhlíkovými anodami, dochází k rozkladu oxidu hlinitého na kovový hliník ve formě taveniny, který se hromadí na dně elektrolyzátoru a v pravidelných intervalech se odčerpává.

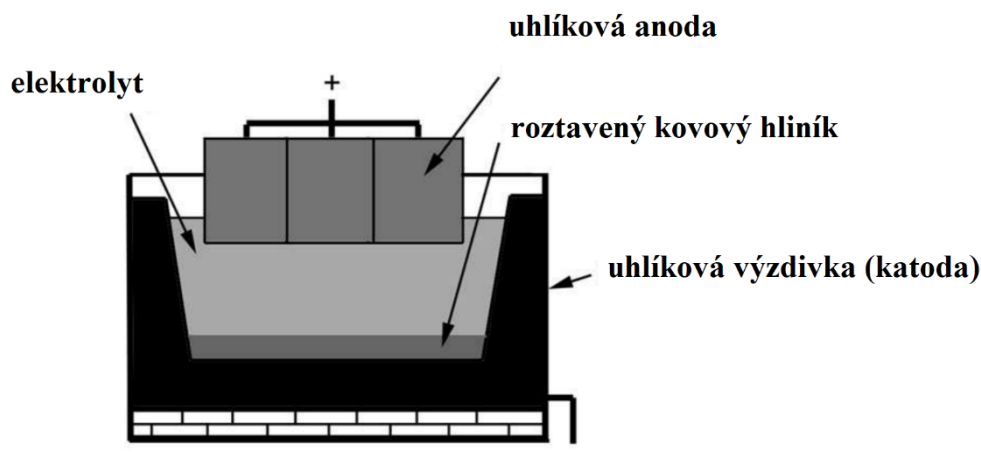
Při elektrolýze probíhá řada reakcí, přičemž nejprve dochází k disociaci oxidu hlinitého z roztavené směsi:



Na katodě, kterou tvoří dno elektrolyzátoru, se vylučuje hliník. Na anodě se hromadí kyslík. Ten poté reaguje s materiálem uhlíkových anod a vytváří směs oxidu uhelnatého (CO) a oxidu uhličitého (CO₂):



Celý proces probíhá nepřetržitě, proto se pravidelně doplňuje oxid hlinitý, odsává se roztavený hliník a mění se opotřebované anody. Běžně se čistota hliníku, vyráběný elektrolýzou, pohybuje okolo 99,5 % [5, 7].



Obr. 2.1 Schéma elektrolyzátoru [5]

2.1.3 Alternativní metody výroby

Postupem času, vinou malé energetické účinnosti elektrolýtické výroby hliníku, která se pohybuje v rozmezí 25–35 %, se hledala náhradní metoda výroby. První z nich byl proces založený na bázi chloridu hlinitého. Tuto metodu jako v roce 1976 představila společnost Alcoa⁷. Vstupní surovina byla opět alumina, která byla smíchána s chlorem za vzniku chloridu hlinitého. Ten sloužil jako elektrolýta, který se dále vylučoval na již čistý hliník a zbytkový chlór, který se znovu použil při reakci. Výhodou byla kontinuálnost procesu a nižší spotřeba energie. Neschopnost materiálů čelit dlouhodobému působení chloridu a postupné zdokonalení efektivity výroby elektrolýzou vedly v roce 1985 k zániku této technologie [6].

⁷ jeden z největších producentů hliníku na světě, firma založena v roce 1888

Několik společností se zabývá tzv. karbotermickou metodou produkce hliníku. Proces zahrnuje redukci vstupní suroviny (na bázi bauxitu a jílu) koksem. Redukce probíhá za vysokých teplot (kolem 2000 °C) v zařízeních podobných vysokým pecím. Výsledný produkt se skládá z hliníku a slitin s křemíkem. Nevýhodou tohoto způsobu výroby je tendence produkovat větší procentuální množství slitin, než čistého kovu [2, 8].

2.2 Vlastnosti hliníku

2.2.1 Fyzikální vlastnosti

Hliník je stříbřitě šedý kov krystalizující v kubické, plošně centrované mřížce (FCC⁸), díky níž má dobré plastické vlastnosti za tepla i studena. Hodnoty vybraných fyzikálních vlastností jsou uvedeny v tab. 2.2 [2].

Tab. 2.2: Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku

Vlastnost	Hodnota
Koordinační číslo	K12
Hustota	2,699 kg·m ⁻³
Parametr mřížky	a = 0,405 nm
Teplota tavení	660 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivost	247 W·m ⁻¹
Elektrická vodivost	62 % IACS ⁹ (Al 99,8)

2.2.2 Chemické vlastnosti

Hliník na vzduchu reaguje s kyslíkem za vzniku stabilní pasivní ochranné oxidické vrstvy Al₂O₃, díky které získává odolnost vůči korozi. Tloušťka této vrstvy se za běžných podmínek pohybuje do 10 nm. Schopnost tvorby ochranné vrstvy na povrchu materiálu se nazývá pasivace a můžeme ji pozorovat i u jiných prvků, např. zinek, titan atd. [3, 5]

2.2.3 Mechanické vlastnosti

Hliník vyniká dobrou plasticitou a tažností, která přesahuje hodnotu 20 %. O tyto vlastnosti se zapříčinil typ krystalografické mřížky. Odráží se to však na nízké pevnosti¹⁰ a tvrdosti¹¹. Proto se čistý hliník nepoužívá jako konstrukční materiál. Pevnost v tahu se může zvýšit při tváření za studena, či přidáním legujících prvků.

Pro slévárenský průmysl jsou podstatné vysoké hodnoty měrné tepelné kapacity (zhruba 0,90 kJ/kg.K) a skupenské teploty tání (přibližně 396 kJ.kg⁻¹). Z nichž vyplývá velká energetická náročnost při tavení [3, 10].

⁸ face-centered cubic

⁹ International Annealed Copper Standart – standardizované označení, udávající elektrickou vodivost měkké mědi. Její hodnota činí 58 MS.m⁻¹ [9]

¹⁰ Rm se pohybuje okolo 70 MPa, ve vyžíhaném stavu kolem 130 MPa

¹¹ uvádí se mezi 20–30 HB

2.3 Aplikace hliníku

Více než polovina produkce hliníku technické čistoty se zpracovává na plechy. V důsledku příznivých vlastností a zvláště nižší ceny se hliník čím dál více využívá v elektrotechnice namísto mědi. Nižší vodivost nahrazuje nižší hmotností a lepší dostupností. Největší výhody nabývá u velkých průřezů, kde jako vodič již téměř vytlačil měď. Jsou to např. pásové vodiče v rozvodnách a rozvaděčích, rozvody velkých výkonů a významné je i použití v kombinaci s ocelí (ocelohliníková lana) pro venkovní dálkové vedení vysokého napětí. Dále jako materiál pro elektrické kondenzátory.

Své uplatnění našel i v jiných odvětvích, jako je např. potravinářský průmysl, pro výrobu obalů (fólie, nápojové plechovky) i ve stavebnictví (rámy oken a dveří, střešní krytiny) [5, 10, 11].



a)

b)

Obr. 2.2 Příklady použití technicky čistého hliníku a) blistr z hliníkové fólie b) hliníkové misky na potraviny [12]

3 SLITINY HLINÍKU

Technicky čistý hliník je převážně kvůli své nízké pevnosti nevhodný pro konstrukční účely. Legováním patřičnými prvky však můžeme výrazně ovlivnit jeho mechanické a technologické vlastnosti. Mezi nejvýznamnější přísady patří: [5, 10]

- Cu (slitina dural)
- Si (slitina silumin)
- Mg (slitina hydronalium)
- a další prvky, např. Mn, Zn, Li

3.1 Označení slitin hliníku dle ČSN EN

Slitiny pro *tváření* se značí dle normy *ČSN EN 573*

ČSN EN 573-1 číselné značení

EN AW - XXXX

EN – Evropská norma

A – hliník

W – tvářené výrobky

XXXX – skupina slitiny

První ze čtyř číslic vyjadřuje skupinu slitin:

1xxx – hliník (min. 99,00% a více)

5xxx – slitiny Al–Mg

2xxx – slitiny Al–Cu

6xxx – slitiny Al–Mg–Si

3xxx – slitiny Al–Mn

7xxx – slitiny Al–Zn

4xxx – slitiny Al–Si

8xxx – slitiny ostatních prvků (např. Al–Li)

Ve skupině 1xxx druhá číslice označuje změnu v mezním obsahu doprovodných prvků, poslední dvě číslice vyjadřují minimální obsah hliníku v procentech, které jsou shodné s dvěma číslicemi za desetinnou čárkou (příklad 1050 – 99,50 % Al).

Ve skupinách 2xxx až 8xxx vyjadřuje druhé číslo modifikaci slitiny. Poslední dvě číslice rozlišují jednotlivé hliníkové slitiny [13].

Slitiny pro *odlitky* se značí dle normy *ČSN EN 1706*

ČSN EN 1706 číselné značení

EN AC - XXXXX

EN – Evropská norma

A – hliník

C – slitina pro odlitky

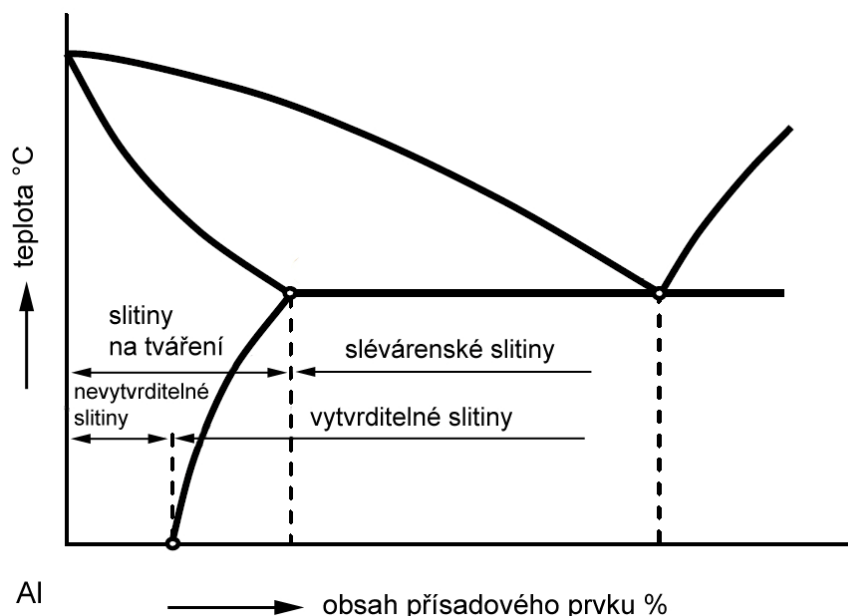
XXXXX – skupina slitiny

První číslo označuje skupinu slitin totožně, jako tomu bylo u předchozí normy. Poslední dvě čísla jsou nuly. Číslice uprostřed kategorizují slitinu [3].

Obvykle se používá i označování pomocí chemického složení kdy v případě technicky čistého hliníku uvádíme za značkou hliníku (Al) čistotu v desetínách, např.: Al 99,7 – značí hliník o čistotě 99,7 %. U slitin se za značkou hliníku uvádí významné legující přísady v procentech, např.: AlMg2 – obsah hořčíku ve slitině hliníku tvoří přibližně 2 % [3].

3.2 Rozdělení slitin

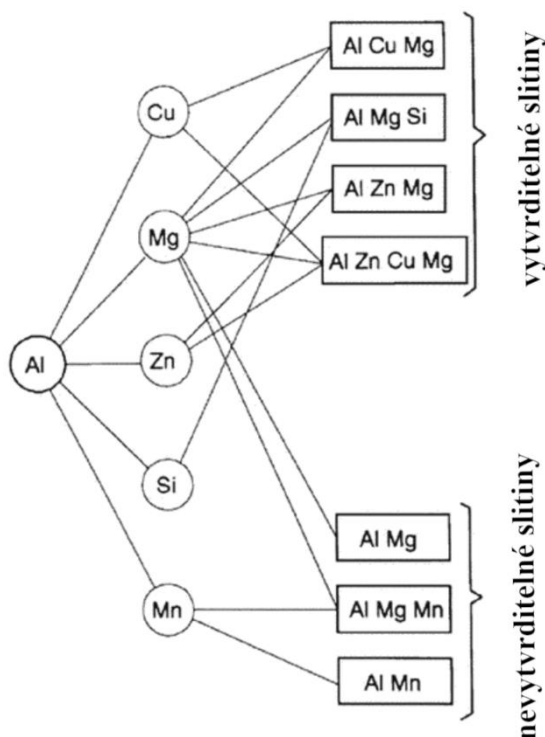
Slitiny hliníku se rozdělují podle technologie výroby na tzv. slitiny ke tváření a na slévárenské slitiny. K získání vyšších pevnostních vlastností hliníkových slitin se využívá mimo jiné postup precipitačního vytvrzování. Podle toho, zda dochází u tohoto typu tepelného zpracování k dostatečnému vytvrzení, můžeme slitiny rozdělit na *vytvrditelné* a *nevytvrditelné* (viz obr. 3.1) [5].



Obr. 3.1 Schéma rozdělení slitin hliníku [14]

Pro slitiny ke tváření je nezbytné, aby v jejich struktuře převládal plastický tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$, který zaručuje dobrou tvařitelnost. Patří sem slitiny s nižším obsahem legujících prvků. Pro slévárnictví se nejčastěji používají slitiny s vyšším obsahem legur, v oblasti eutektika. V této oblasti se uplatňuje nízký¹² interval tuhnutí, který je klíčový pro většinu slévárenských vlastností (např. zabíhavost nebo sklon ke vzniku staženin) [2, 11].

¹² v některých případech se využívá širokého pásma tuhnutí k tvorbě heterogenní struktury – kompozic, jsou to materiály pro kluzná uložení (u hliníku slitiny Al-Sn nebo Al-Pb) [11]



Obr. 3.2 Rozdělení hliníkových slitin dle možnosti tepelného vytvrzování [6]

3.3 Přehled tvářených nevytvrditelných hliníkových slitin

Mezi nevytvrditelné slitiny hliníku nejčastěji zařazujeme, kromě technicky čistého hliníku (skup. 1xxx), také slitiny typu Al-Mn (3xxx), Al-Mg (5xxx) a Al-Si (4xxx)¹³. Jediná možnost zlepšení jejich mechanických vlastností spočívá v tváření za studena, případně substitučním zpevněním tuhého roztoku. Drtivá většina nevytvrditelných slitin hliníku se zpracovává na válcované výrobky (pláty, plechy a fólie)¹⁴. Hlavní kritéria, podle kterých se volí použití těchto materiálů jsou: [5, 6]

1. Strukturální vlastnosti – pevnost a trvanlivost
2. Tvarovatelnost – složitost a celková výnosnost výsledného produktu
3. Kvalita povrchu – celkový vzhled

3.3.1 Hliník technické čistoty (skupina 1xxx)

Přednosti materiálů této kategorie spočívají ve vynikající tvarovatelnosti, vysoké elektrické vodivosti, odolnosti vůči atmosférické korozi a snadné svařitelnosti. Hodnota meze pevnosti v tahu se obvykle pohybuje od 70 MPa, ale díky schopnosti deformačního zpevnění se může vyšplhat až do hodnot kolem 185 MPa. Nejpopulárnější typy hliníku této skupiny jsou 1100 a 1350. Díky již zmiňované vodivosti, se nejčastěji využívají v oblasti elektrotechniky (vodiče). Dále jsou oblíbené v potravinářském průmyslu (různé formy obalů) z důvodu snadné tvarovatelnosti a odolnosti proti korozi [15, 16]

¹³ mnohem větší uplatnění mají siluminy jako slévárenská slitina

¹⁴ pro plechy se běžně definuje tloušťka v rozmezí 0,25–6 mm [15][15]

3.3.2 Slitiny Al-Mn (skupina 3xxx)

Typická charakteristika těchto slitin se zakládá na dobrém poměru mezi tvarovatelností s korozní odolností a pevností, která se je v rozmezí 110–285 MPa. Proto se často používají jako pevnější náhrady čistého hliníku.

Obsah *Mn* se uvádí nejvýše do 1,5 %. Vyšší množství způsobuje v kombinaci s nežádoucí příměsí *Fe* vznik intermetalické sloučeniny $(\text{FeMn})\text{Al}_6$, která způsobuje křehnutí. Přidáním hořčíku (slitina Al-Mn-Mg), docílíme ke zpevnění tuhého roztoku a hodnota R_m může narůst až na 320 MPa, typické pro slitinu 3104 (AlMn1Mg1Cu).

Nejoblíbenějším výrobkem z této skupiny bývají nápojové plechovky (pro slitiny 3004 a 3104), díky kterým se stávají jedním z nejvíce vyráběných hliníkových slitin. Své uplatnění našly i v automobilovém průmyslu (chladiče), nebo stavebnictví (střešní krytiny) [2, 6, 16].

3.3.3 Slitiny Al-Mg (skupina 5xxx)

Materiály této skupiny (souhrnné označení hydronalium) dosahují v porovnání se všemi skupinami tepelně nevytvrditelných slitin nejvyšších hodnot meze pevnosti. R_m dosahuje až 430 MPa po deformačním zpevnění. Obrovskou výhodou je mimo velké pevnosti, taky velmi dobrá odolnost, proti korozi, zvláště proti slané vodě. Proto se často tato slitina používá v konstrukcích např. u mostů, či částí lodních trupů. Velmi oblíbené se stávají v automobilovém průmyslu pro výrobu šasi. Materiály jsou dobře svařitelné a disponují velkou houževnatostí, kterou neztrácí ani při velmi snížených teplotách¹⁵.

Obsah hořčíku se pohybuje od hranice 0,8 % až k 6 % maximálně. U slitin s obsahem *Mg* 3–4 % je tendence k precipitaci tzv. β -fáze (Mg_5Al_8 nebo Al_3Mg_2) na hranici zrn, čímž dochází k náchylnosti na mezikrystalovou korozi. Vznik β -fází nastává již při pokojové teplotě, při zvýšené teplotě nebo deformačním zpevnění se tento proces urychluje. Existuje možnost přidání malého množství chromu a manganu, čímž zvýšíme tahové vlastnosti, při použití menšího množství hořčíku. Dosáhneme tak přibližně stejných hodnot, jako u slitin s vyšším obsahem *Mg* a vyhneme se vzniku nežádoucích fází. Další problém u této skupiny spočívá v deformačním zpevnění, které se postupem času ze slitin vytrácí. K odstranění takového efektu se provádí deformační zpevnění za mírně zvýšených teplot (120 až 150 °C) a stabilizací. Tento druh tepelného zpracování¹⁶ rovněž snižuje pravděpodobnost výskytu β -fází.

Hlavní použití slitin Al-Mg představuje, kromě již zmíněného konstrukčního hlediska, také ve výrobě cisteren a tlakových nádob, převážně pro kryogenní použití. V armádě se používá pro plátování lehkých obrněných vozidel [6, 15, 16].

3.4 Přehled tvářených vytvrditelných hliníkových slitin

Do této kategorie materiálu spadají slitiny, jejichž mechanické vlastnosti se dají velkým způsobem ovlivnit tepelným zpracováním zvaným *precipitační vytvrzování* (viz kap. 4.2). Patří sem převážně slitiny skupiny 2xxx (Al-Cu, Al-Cu-Mg), označované jako duraly. Dále pak slitiny skupiny 6xxx (Al-Mg-Si) a skupiny 7xxx (Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu).

¹⁵ teploty pohybující se až do -270 °C [16]

¹⁶ v tabulkách nese označení H3 (viz příloha)

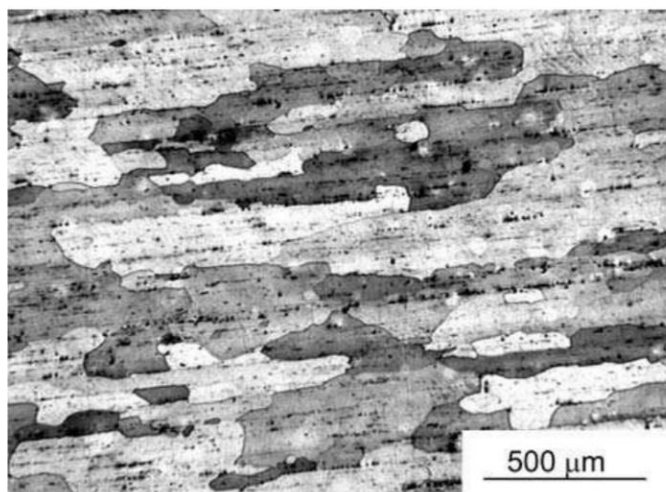
Tyto slitiny se dále mohou rozdělovat na materiály se střední pevností a snadnou svařitelností (platí pro Al-Mg-Si a Al-Zn-Mg) a na materiály s vysokou pevností a omezenou svařitelností (Al-Cu, Al-Cu-Mg a Al-Zn-Mg-Cu), které se ve velké míře používají v leteckém průmyslu. Slitiny s obsahem mědi často podléhají korozi, a proto je nutné povrchového ošetření (např. plátování¹⁷) [6].

3.4.1 Slitiny Al-Cu (skupina 2xxx)

Maximální rozpustnost mědi v hliníku činí při eutektické teplotě 548 °C přibližně 5,7 %, která se s klesající teplotou rapidně snižuje (méně než 0,5 %). Díky této vlastnosti je umožněno precipitační vytvrzování¹⁸. Vyšší obsah mědi zajišťuje dobrou obrobitelnost, avšak na úkor náchylnosti ke korozi¹⁹ a podmíněné svařitelnosti [3].

Častým přísadovým prvkem zde bývá *Mg*, který způsobuje vyšší pevnost (až do hodnoty 530 Mpa). Jmenovitě se jedná o slitinu 2224 (s obsahem Cu \pm 4,4 % a Mg \pm 1,5 %). Proto slitiny Al-Cu-Mg můžeme zařadit mezi tzv. vysokopevnostní slitiny [15].

Primární použití těchto slitin nalezneme zejména v leteckém a automobilovém průmyslu u šroubovaných nebo nýtovaných konstrukcí. U binárních materiálů Al-Cu jsou hlavními produkty výlisky a plechy, které se povrchově chrání tenkou vrstvou hliníku (tzv. plátované duraly) [10]. Pro slitiny s obsahem přibližně 2 % hořčíku je možnost vystavování dlouhodobě vyšší teplotě (zhruba 200 °C), při použití niklu můžeme provozní teplotu zvýšit až na 300°C. Této vlastnosti se používá u teplotně namáhaných součástí (např. písty spalovacích motorů) [5, 10].



Obr. 3.3 Mikrostruktura tvářené slitiny AlCu6 [5]

3.4.2 Slitiny Al-Mg-Si (skupina 6xxx)

Slitiny 6. skupiny se vyznačují při vytvrzeném stavu horšími mechanickými vlastnostmi, než tomu bylo u slitin duralu (R_m dosahuje hodnot max. 350 MPa). Nepřítomnost mědi však zlepšuje korozní odolnost. Obsah *Mg* se pohybuje mezi 0,6–1,2 % a přítomnost *Si* je v rozmezí 0,4–1,3 %. Na precipitačním vytvrzování má zásluhu fáze Mg_2Si [5, 15].

¹⁷ krytí povrchu materiálu tenkou vrstvou hliníku [5]

¹⁸ u slitin Al-Cu je vytvrzování umožněno díky vyloučenému precipitátu $CuAl_2$, u Al-Cu-Mg pak díky vyloučené fázi Al_2CuMg [17][17]

¹⁹ často se jedná o mezikrystalickou korozi [18]

Pro dodatečné zvýšení pevnosti se slitiny legují malým množstvím Mn, Cr, nebo Cu. Avšak u slitin s obsahem mědi více než 0,5 % dochází ke snížení korozivzdornosti [15].

Slitiny Al-Mg-Si patří mezi nejvýznamnější hliníkové materiály. Pro svou výbornou schopnost extruze (v kombinaci se svařitelností) je z nich vyráběna většina hliníkových profilů. Proto mají své zastoupení převážně ve stavebnictví [15].

3.4.3 Slitiny Al-Zn (skupina 7xxx)

Materiály na bázi Al-Zn získávají po vytvrzování nejvyšších pevností ze všech hliníkových slitin (R_m může dosahovat hodnoty až 690 Mpa). Kromě zinku tyto slitiny obsahují také hořčík a měď. Technicky použitelné slitiny běžně obsahují 3–8 % Zn a ≥ 1 % Mg. Při pokojové teplotě dosahuje rozpustnost zinku v hliníku přibližně 2 %. Vytvrzování probíhá již za studena, je způsobeno přítomností intermetalických fází $MgZn_2$ a $Al_2Zn_3Mg_3$ [3, 15].

Hlavními nedostatky těchto slitin spočívají v nižší lomové houževnatosti a vyšší vrubové citlivosti, než je tomu u duralů. Také mají tendenci ke korozi pod napětím [10].

Slitiny Al-Zn-Mg nedosahují takové pevnosti, jako Al-Zn-Mg-Cu, ale poskytují možnost svařitelnosti. Obsah mědi, který se uvádí maximálně do 2 %, výrazně zvyšuje pevnostní charakteristiku a snižuje náchylnost na korozi pod napětím, neboť umožňuje precipitační vytvrzování až při zvýšené teplotě. Zároveň zvýšený obsah mědi může způsobovat atmosférickou korozi. Obrovský vliv na lomovou houževnatost mají nežádoucí přísady železo a křemík [15].

Slitiny na základě Al-Zn se používají pro vysoce namáhané součásti, nejčastěji v leteckém a automobilovém průmyslu [5].

3.4.4 Slitiny Al-Si (skupina 4xxx)

Siluminy se v drtivé většině využívají jako slévárenská slitina. Ojedinele se však můžeme s těmito slitinami setkat i při tváření, jedná se o tzv. tvářené siluminy. Binární slitiny Al a Cu nemají schopnost precipitačního vytvrzování, a proto nemají větší využití. Rozdíl nastává přidáním legujících prvků (nejčastěji Mg, Cu a Ni), kde může dojít k částečnému vytvrzování.

Díky vysokému obsahu křemíku mají tyto slitiny velmi dobré kluzné vlastnosti, odolnost proti otěru a nízkou tepelnou roztažnost. S tím souvisí jejich největší využití – kované písty spalovacích motorů [10, 15].

3.4.5 Další slitiny hliníku (skupiny 8xxx)

Slitiny této skupiny nemají přesně definovanou hlavní přísadu. Nejčastěji to je železo, nikl, nebo lithium. Rozšířenou slitinou této skupiny bývá Al-Li. Oblíbenou se stala především v oblasti letectví, z důvodů maximální snížení hmotnosti letadel²⁰. Další výhodou lithia představuje zvýšení modulu pružnosti v tahu E v porovnání s běžnými slitinami hliníku.

²⁰ přidáním každého 1 % Li získáme o 3 % nižší hustotu této slitiny [15]

Binární slitiny Al-Li disponují nízkou tažností a zvýšenou křehkostí. Proto se vývoj těchto materiálů soustředí na komplexně legované slitiny, které mají za úkol tyto negativní vlastnosti eliminovat. V ČR se tyto slitiny nevyrábí, především z důvodu náročnosti operace. Lithium patří mezi vysoce reaktivní prvky, který snadno oxiduje na vzduchu. Výrobu je nutné provádět v ochranné atmosféře (např. vakuum, či argon) [5, 10, 15].

3.5 Slévárenské slitiny hliníku

Slévárenské slitiny obsahují na rozdíl od slitin podstatně vyšší obsah přísadových prvků, která tvoří tvrdé a křehké fáze ve struktuře materiálu. Příměsi však často snižují teplotu likvidu a usnadňují její tavitelnost. Materiály s eutektickou strukturou se pyšní nejlepšími slévárenskými vlastnostmi. Tyto vlastnosti jsou úzce spjaty s nízkým intervalem tuhnutí. Slitiny můžeme rozdělovat podle obsahu legujících prvků na slitiny podeutektické, eutektické a nadeutektické. Ve slévárenství se primárně můžeme setkat se slitinami podeutektickými a eutektickými (nadeutektické slitiny se zřídka využívají jen u slitiny Al-Si, tzv. nadeutektický silumin). Charakteristické vlastnosti, dle kterých určíme vhodnost pro odlívání, jsou: [3, 5, 6]

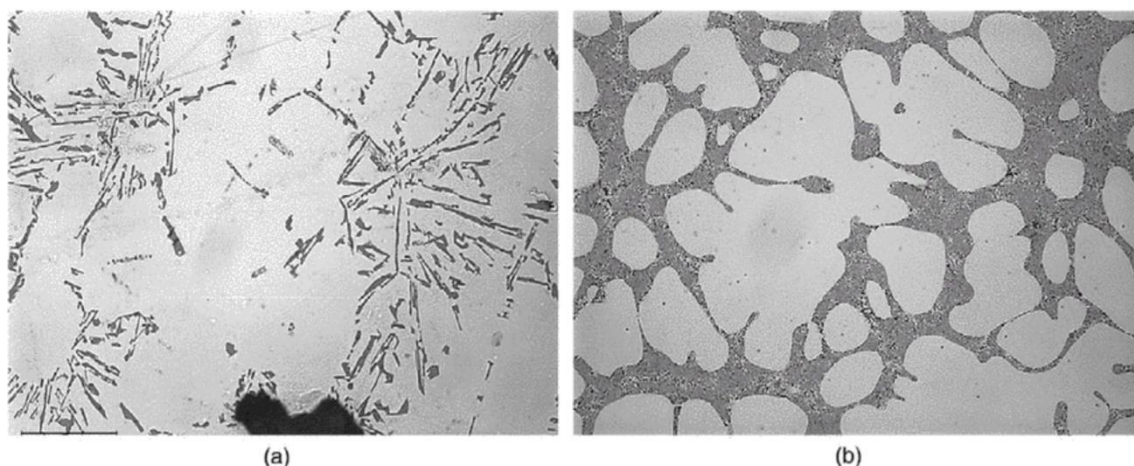
- Zabíhavost – schopnost tekutého materiálu vyplňovat dutinu formy
- Sklon ke vzniku staženin – objemový úbytek materiálu během tuhnutí a vznik staženin
- Sklon k naplynění – tendence tvorby plynových bublin v odlitku
- Odolnost proti vzniku trhlin a prasklin – odolnost vůči napětí, které se generuje během ochlazování

Slitiny pro odlitky nedosahují takových mechanických hodnot, jako slitiny tvářené, maximální hodnota meze pevnosti se běžně pohybuje okolo 250 MPa²¹. Výsledná struktura je již ovlivněna způsobem odlévání, přičemž nejnižších pevnostních charakteristik dosahuje při lití do písku (hrubozrnná struktura), jemnější strukturu s lepšími mechanickými vlastnostmi získává při tlakovém lití, nebo odlévání do kovových forem. Vhodným zásahem do taveniny se může výrazně ovlivnit mikrostruktura: [10].

Očkováním se přidává malé množství vhodné látky, která má za úkol zvýšit nukleaci krystalizačních zárodků, čímž se dosahuje jemnější struktury, lepší homogenitu, následně i mechanických vlastností materiálu [5, 19].

Modifikací se přidává prvek ovlivňující morfologii zrn. Dochází ke změně tvaru zrna při tuhnutí, což se pozitivně odráží na mechanických vlastnostech (dochází ke zvýšení pevnosti v tahu a tažnosti) [5, 19].

²¹ u slitin na bázi Al-Si

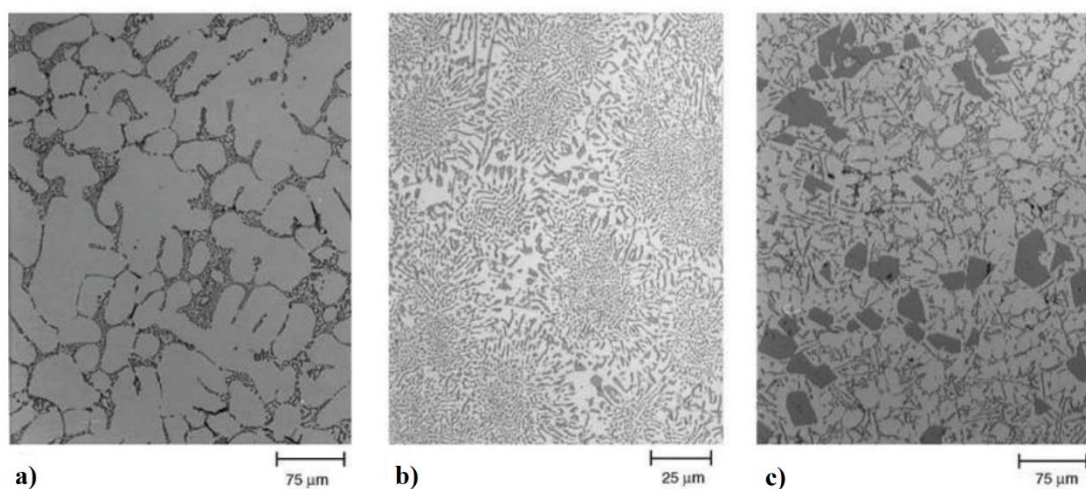


Obr. 3.4 ukázka podeutektické slitiny AlSi7 v a) nemodifikovaném b) modifikovaném stavu pomocí stroncia (světlé části – $\alpha(\text{Al})$, tmavé části – eutektikum $\alpha(\text{Al})+\text{Si}$) [20]

3.5.1 Slévárenské slitiny typu Al-Si (silumin)

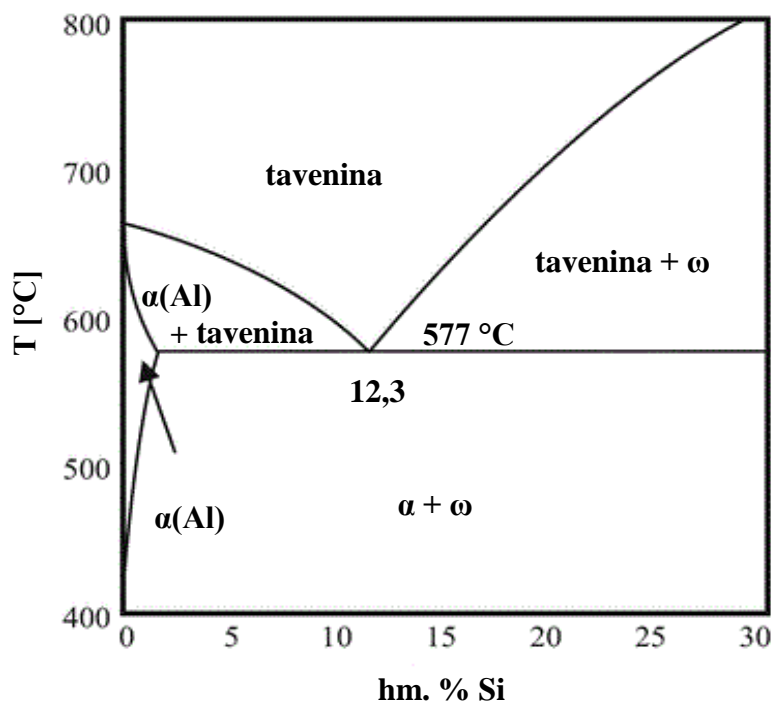
Materiály na bázi Al-Si patří mezi nejvýznamnější slévárenské slitiny. Obvyklý obsah křemíku se pohybuje mezi 5–25 %. Maximální jeho rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ činí přibližně 1,6 % při eutektické teplotě (577 °C). Binární slitiny Al-Si se nedají precipitačně vytvrzovat, to je umožněno až díky přítomnosti Mg (precipitát Mg_2Si) nebo Cu (AlCu_2). Siluminy se podle obsahu Si dělí na: [3, 5]

- Podeutektické siluminy – obsah Si činí 5–11 %, struktura je tvořena primárními dendrity $\alpha(\text{Al})$ a eutektikem (tvořeno fázemi $\alpha(\text{Al})+\text{Si}$), které se vylučuje v mezidendritických prostorech
- Eutektické siluminy – obsah Si se pohybuje přibližně od 11,5–13 %, struktura se skládá převážně z eutektika
- Nadeutektické siluminy – obsah Si činí přes 13 %, v krajních případech až do 25 %. Jejich struktura se kromě eutektika skládá i z primárních částic křemíku (tuhý roztok ω – složen z eutektika + Si)



Obr. 3.5 Mikrostruktura lité slitiny Al-Si s různým obsahem křemíku [21]

Na obr. 3.5 se nachází ukázky mikrostruktury běžné slévárenské slitiny Al-Si. V případě *a*) se jedná o podeutektickou slitinu, světlé krystaly – $\alpha(\text{Al})$, tmavé oblasti – eutektikum. Na obrázku *b*) je slitina eutektická (tvořena primárně eutektikem). Na posledním obrázku je slitina nadeutektická (tmavé částice – primární krystaly Si) [21].



Obr. 3.6 Binární fázový diagram Al-Si [21]

Křemík, jakožto hlavní přísadový prvek, má pozitivní vliv na většinu slévárenských vlastností (např. zvyšuje zabíhavost, snižuje sklon ke vzniku staženin, apod.). Přednost binárních slitin Al-Si je ve výborné korozivzdornosti a tvárnosti. Avšak díky nízké pevnosti se příliš nevyužívají pro tvarové odlitky. Uplatňují se však jako hliníkové pájky.

Pro odlévání složitějších odlitků se používají tzv. *speciální siluminy*. Jedná se o slitiny hliníku Al-Si-Mg a Al-Si-Cu, které díky vytvrzování dosahují větších pevnostních charakteristik na úkor nižších slévárenských vlastností. Přidáním dalších legujících prvků (Zn, Ni, Ti, apod.) se ovlivňují další rysy slitin: přidáním Ni pozitivně ovlivníme mech. vlastnosti za zvýšených teplot, Zn zlepšuje obrobiteľnosť a zabíhavost, Ti je vhodný pro očkovaní.

Speciální siluminy jsou používány pro tvarově složitě, tenkostěnné odlitky. Mohou to být disky kol, skříňe spalovacích motorů a převodovek, nebo písty a hlavy válců [3, 10].

3.5.2 Slévárenské slitiny typu Al-Cu (dural)

Slitiny typu Al-Cu dosahují vysokých hodnot pevnosti (kolem 400 MPa ve vytvrzeném stavu). Obsah mědi se nejčastěji pohybuje mezi 4–5 %. Ve srovnání se slitinami Al-Si dosahují přibližně dvakrát větších hodnot tažnosti a lomové houževnatosti. Avšak díky širokému teplotnímu intervalu krystalizace se vyznačují horšími slévárenskými vlastnostmi. Další negativem bývá, jako u všech slitin hliníku a mědi, nízká odolnost vůči korozi (nutnost povrchového ošetření).

Odlitky ze slitin Al-Cu se využívají pro tepelně namáhané součástky z důvodu výborných mechanických vlastností za zvýšených teplot²². Převážně to jsou hlavy válců a písty větších rozměrů. Hojně využívány jsou i v leteckém průmyslu [3, 10].

3.5.3 Slévárenské slitiny typu Al-Mg (hydronalium)

Slitiny Al-Mg nevykazují známky vytvrzování, tudíž jejich pevnostní charakteristiky nedosahují takových hodnot. Na druhou stranu disponují výbornou rázovou houževnatostí, obrobiteľností a leštitelností. Velká náchylnost k naplynění zhoršuje zásadním způsobem veškeré slévárenské vlastnosti. Ke snížení naplynění se využívá přidáním malého množství beryllia, které zároveň zlepšuje tekutost a zabíhavost slitiny. K zlepšení slévárenských vlastností může napomoci i přidání křemíku, který zároveň umožňuje precipitační vytvrzování. Zásadním způsobem se však snižuje tažnost slitin hydronalia, proto se doporučuje přidávat Si jen v minimálním množství.

Slitiny Al-Mg se používají tam, kde je nutná vysoká odolnost proti korozi. Převážně proti mírně alkalickému prostředí, nebo působení mořské vody (např. konstrukce lodí), dále pak v potravinářství nebo chemickém průmyslu. Z důvodu výborné leštitelnosti se slitiny využívají i pro dekorativní účely [3, 10].

3.5.4 Slévárenské slitiny typu Al-Zn

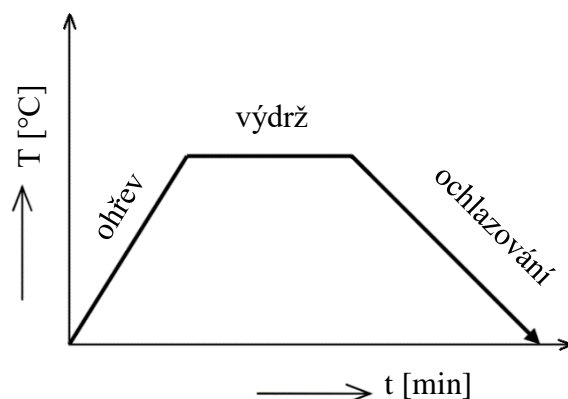
Hlavní přísadou těchto slitin bývá společně se zinkem také hořčík. Proto se nejčastěji setkáváme se slitinami Al-Zn-Mg. Obsah Zn se pohybuje mezi 5–7 %, u Mg se uvádí hodnota do 1 %. Slitiny disponují vysokou rozměrovou stabilitou, dobrou obrobiteľností a odolností vůči korozi. V důsledku značnému sklonu ke vzniku staženin a praskání za tepla, jsou slévárenské vlastnosti značně limitovány. Další nevýhodou je tendence koroze pod napětím, které se potlačuje přidáním omezeného množství železa [3, 10].

Slitiny tohoto typu již nejsou příliš běžné, primárním využitím se stala výroba zahradnických pomůcek, či zahradnického nábytku [16].

²² 350–450 °C

4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

Tepelné zpracování se definuje jako pochod, při kterém se daný výrobek podrobuje jednomu, či sérii žihacích cyklů za účelem dosažení požadovaných vlastností a struktury. Žihací cyklus se formuluje, jako změna teploty výrobku v určitém časovém rozmezí a v závislosti na čase [23].



Obr. 4.1 Žihací cyklus [23]

Účelem tepelného zpracování (TZ) hliníkových slitin bývá primárně snaha o zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřního pnutí nebo ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře daného materiálu. TZ lze upravovat nejen mechanické vlastnosti, ale i technologické (např. zlepšení obrobitelnosti), či chemické (korozní odolnost) [3].

Odlitky z hliníkových slitin se z velké části používají v tepelně nezpracovaném stavu. Nejčastěji se využívá TZ u součástí, které se odlévají do pískových forem, nebo pomocí gravitačního lití do kovových forem. Důvodem je vznikající hrubší struktura a značná segregace přísadových prvků. U tlakově litých odlitků je výsledná struktura, z důvodu rychlejšího procesu ochlazování, více homogenní a případný efekt TZ je zanedbatelný. Proto se v drtivé většině případů tlakově lité odlitky používají již v litém stavu [3].

TZ slitin hliníku se může zjednodušeně rozdělit na dvě základní skupiny – *žihání* a *vytvrzování*.

4.1 Přehled žihacích procesů

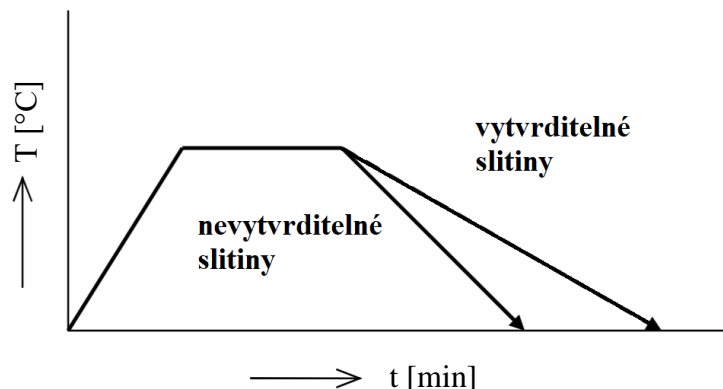
Žihání se definuje jako ohřev daného materiálu na požadovanou teplotu, následné výdrži na této teplotě a postupném ochlazování na pokojovou teplotu. Podle výsledného efektu, kterého docílíme, rozdělujeme žihání hliníkových slitin na několik druhů: [5]

Rekrystalizační žihání

Jedná se o způsob TZ, který se uplatňuje u materiálů tvářených za studena. Dochází zde k rekrystalizaci původně deformované struktury, aniž by docházelo ke vzniku nových fází. Deformovaná zrna jsou nahrazena nově vzniklými zárodky, které se postupně rozrůstají, až do úplného nahrazení původních zrn. Následkem toho dochází ke zvýšení plastických vlastností na úkor snížení pevnosti. Proces se uskutečňuje nejčastěji v teplotním rozmezí 250–500 °C. Použitá teplota závisí na několika faktorech. Zejména na velikosti deformace²³ za studena a také na chemickém složení slitiny [23].

²³ s rostoucí deformací klesá teplota rekrystalizace a velikost zrn [23]

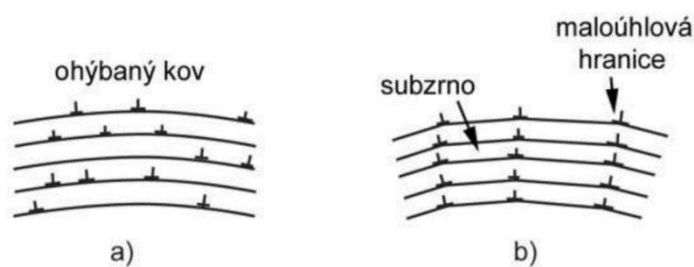
Podle schopnosti vytvrzování slitiny, je nutno volit strategii ochlazování. U slitin, které nejsou schopny vytvrzování, je možnost po skončení rekrystalizace ochlazování na vzduchu. Nicméně slitiny vytvrditelné se musí ochlazovat mnohem pomaleji, neboť by mohlo dojít k částečnému přesycení tuhého roztoku, zisku nerovnovážného stavu, a tím se zapříčinit o nechtěné zvýšení pevnosti [23].



Obr. 4.2 Schéma rekrystalizačního žhání s rozdílnou dobou ochlazování [23]

Silně deformovaný materiál v sobě akumuluje energii, která se projevuje velkým počtem strukturních poruch. Taková soustava je termodynamicky nestabilní a má tendenci se navrátit do stabilnějšího stavu. Motorem této přeměny je zvýšená teplota, která aktivuje především difúzní pochody, dochází ke snížení vnitřní energie – odpevnění materiálu. Tento proces se skládá s několika stádií: [5, 23]

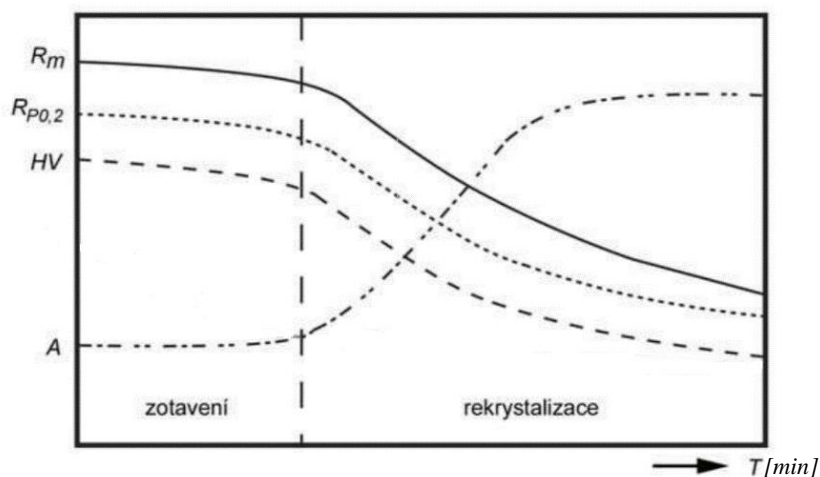
Zotavením – čímž se rozumí změny, které nastanou v deformovaném materiálu ještě před tím, než začne k rekrystalizaci. V tomto stádiu zůstává deformační struktura zachována, dochází pouze k uspořádání bodových poruch a dislokací, které se urovňávají do malouhlových hranic²⁴. Vznikají tak oblasti s nízkou koncentrací poruch (tzv. subzrna) a celý proces se nazývá polygonizace [5, 23]



Obr. 4.3 Schéma polygonizace, a) materiál tvářený včetně neuspořádaných dislokací, b) tvorba subzrn ohraničené malouhlovými hranicemi [5].

Druhým stádiem odpevnění je *rekrystalizace* – při níž dochází k nukleaci a následnému růstu zárodků nových zrn v oblastech s nižší deformační energií, než je v jeho okolí [5, 23].

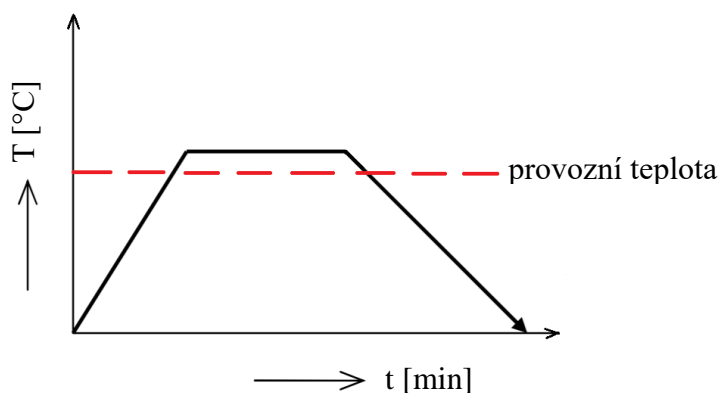
²⁴ hranice zrn dvou sousedních krystalových mřížek s odchylkou menší než přibližně 15° [5]



Obr. 4.4 Změny vlastností materiálu během rekrytalizačního žíhání [5]

Stabilizační žíhání

Stabilizační žíhání se provádí u slitin, které pracují za zvýšené teploty, případně kde dochází během provozu ke značnému ohřevu (např. třením). Nejčastěji se je tento druh TZ aplikuje u odlitků. Provádí se za účelem stabilizace struktury, rozměrů, mechanických či fyzikálních vlastností. Teplota stabilizačního žíhání překračuje teplotu provozní, obvykle se pohybuje v rozmezí 240–350 °C [2, 3, 23].



Obr. 4.5 Schéma stabilizačního žíhání [23]

Žíhání ke snížení pnutí

Jedná se o druh TZ, které probíhá pod teplotou rekrytalizace, následnou výdrží na této teplotě a v závěru řízeným ochlazením. Teplota žíhání se běžně pohybuje mezi 200 až 250 °C, při důkladnějším snížení pnutí je nutno tuto teplotu zvýšit až na 300–400 °C. Ochlazení probíhá, nejméně do teploty 200 °C, a provádí se v peci nebo na vzduchu [3, 23]

Homogenizační žíhání

Tento druh žíhání patří mezi časově nejnáročnější (běžně se pohybuje v řádu hodinách) a odvíjí se od počátečního stavu struktury dané slitiny. Provádí se z důvodu částečného snížení, nebo úplného odstranění chemické heterogenity difúzními procesy. Homogenizace probíhá při vysoké teplotě²⁵. U slitin pro odlitky se obvykle provádí homogenizační žíhání ihned po krystalizaci, zvláště u odlitků odlévaných gravitačně do pískových forem (velká nerovnoměrnost struktury v litém stavu). Velkou měrou se na rychlosti difúze podílí přísadové prvky slitiny. Obsahuje-li materiál přísady s nízkým koeficientem difúze (např. Mn, Cr nebo Fe), značně se protahuje doba žíhání a vzhledem vysoké teplotě ohřevu se riskuje zhrubnutí zrna, čímž se zhoršují mechanické vlastnosti [2, 3, 23].

Žíhání na měkko

Používá se velmi zřídka, a to pouze u vytvrzených slitin, u kterých má být zpětně dosaženo rovnovážného stavu. Teplota se pohybuje mezi 350–450 °C. Závěrem probíhá pozvolné ochlazování, nejprve v peci (přibližně do 200 °C), závěrem na vzduchu [3].

4.2 Vytvrzování – precipitační zpevnění

Vytvrzování patří mezi nejvýznamnější TZ hliníkových slitin. Využívá se ke zvýšení pevnostních charakteristik (mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost), tažnost se obvykle snižuje. Slitina, podléhající vytvrzování, musí splňovat několik kritérií: [5]

- slitina musí obsahovat dostatečné množství přísadových prvků
- legující prvek musí mít dostatečnou rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$
- rozpustnost daného přísadového prvku se musí v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ zvyšovat

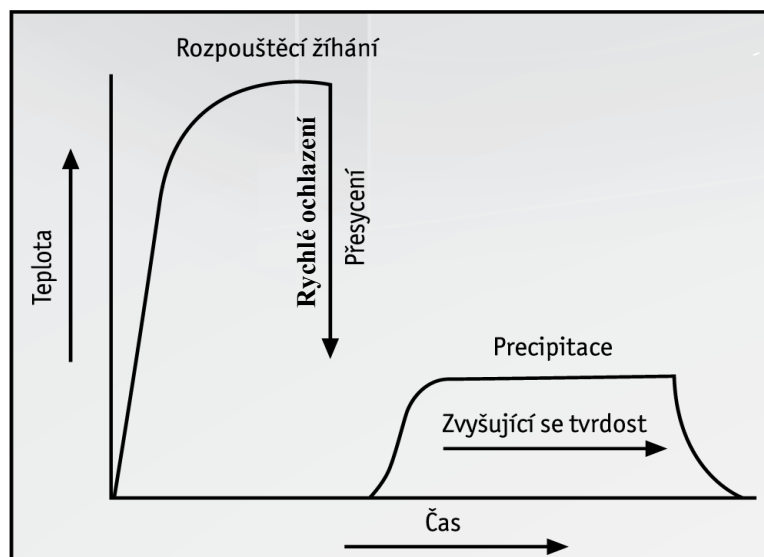
Mezi základní vytvrditelné legury ve slitinách hliníků patří hlavně Cu a Mg, dále pak Zn a Ni. Vytvrzování se může provádět u binárních slitin, které obsahují daný vytvrzovací prvek (např. Al-Cu), ale také u vícesložkových slitin, kde se vytvrzující prvek nachází v dostatečném množství (např. Al-Mg-Si) [3].

Princip vytvrzování spočívá v přítomnosti přísadových prvků v matici, které mají za zvýšené teploty mnohem vyšší rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Při ohřevu na danou teplotu získáme nasycený tuhý roztok, který by při pomalém ochlazování vylučoval tento prvek jako samostatnou fázi. Díky vysoké rychlosti ochlazování se prvek nestačí vyloučit a dochází ke vzniku přesyceného roztoku $\alpha(\text{Al})'$, který se postupem času rozpadá na stabilnější části. Tento krok je úzce spojen s procesem zvaným precipitace, kdy v tuhém roztoku dochází k vylučování jemných částic intermediálních fází, tzv. precipitátů, které představují překážku pro skluz dislokací a vyvolávají vnitřní pnutí – dochází ke zpevnění materiálu [3, 5, 23].

Precipitační zpevnění probíhá ve třech, navzájem na sebe navazujících krocích:

1. rozpouštěcí žíhání
2. rychlé ochlazení
3. stárnutí (precipitační vytvrzení)

²⁵ teplota blízká křivce solidu



Obr. 4.6 Průběh precipitačního vytvrzování [24]

Rozpouštěcí žíhání

Tento druh žíhání představuje ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu, která se nachází nad křivkou změny rozpustnosti. Teplota žíhání se odvíjí na druhu slitiny, v praxi se používají běžně teploty 10–15 °C pod eutektickou teplotou dané slitiny. Následuje výdrž na této teplotě, která musí být dostatečná, aby proběhlo rozpuštění intermetalických fází, které obsahují vytvrzující přísadové prvky, a mohla tak vzniknout prakticky homogenní struktura. Doba výdrže se pohybuje v rámci minut (tenké plechy) až po desítky hodin.

Hodnotu žíhací teploty je nutno udržovat ve velmi úzkých tolerancích (± 5 °C). Pokud by teplota příliš kolísala, mohlo by se stát, že bude v jeden moment již příliš vysoká, čímž dochází k natavení slitiny na hranici zrn, zhrubnutí zrna, a tím pádem ke znehodnocení celého procesu. Při nízké teplotě by se nemusela intermetalická fáze dostatečně rozpustit a celkově by proběhlo nižší vytvrzování, než je běžné [3, 15].

Rychlé ochlazení

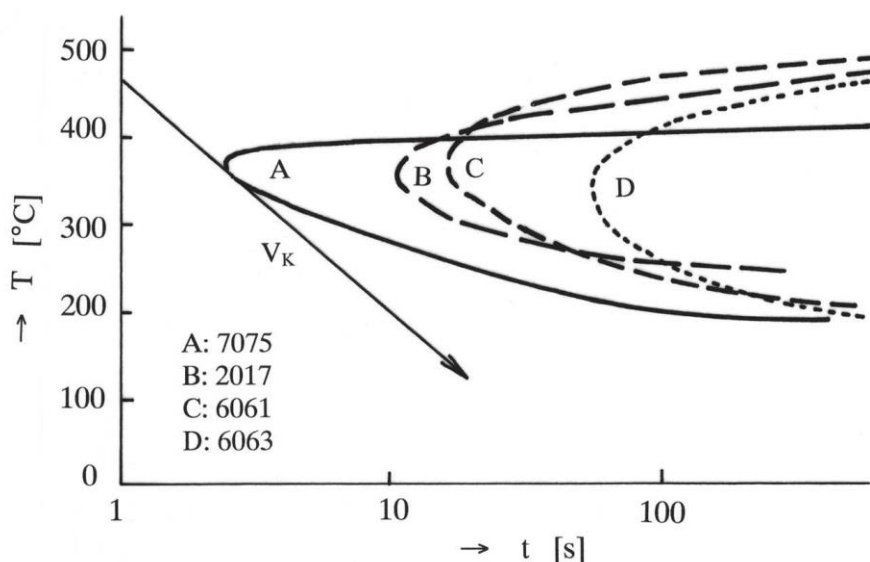
V momentě, kdy dochází k úplnému nasycení tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ daným přísadovým prvkem, nastává proces ochlazení. Je nutné, aby doba mezi vyjmutím dané součástky a ponořením do chladicího média byla co nejkratší, aby se zamezilo případné segregaci fází přísadového prvku na hranici zrn, čímž by se podstatně zhoršily konečné vlastnosti.

Rychlost ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání je závislá na volbě chladicího média. Při použití vody, nebo chladicího prostředku na bázi vody, je nutné brát v potaz velký skok mezi teplotou ponořeného materiálu (mnohem vyšší) a teplotou bodu varu vody. Proto se při ochlazování vytváří na povrchu materiálu pára, která tvoří izolační vrstvu a zabraňuje rovnoměrnému ochlazování. Proto je nutnost, aby ochlazování probíhalo v proudícím médiu, popřípadě, aby se s danou nádobou pohybovalo [3, 23].

Tab. 4.1 Ochlazovací rychlost médií [23]

Ochlazovací médium	Rychlost ochlazování [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$] v intervalu 300–200 $^{\circ}\text{C}$
Voda 18 $^{\circ}\text{C}$	600
Voda 26 $^{\circ}\text{C}$	500
Voda 50 $^{\circ}\text{C}$	100
10 % vodní roztok NaOH	1200
10% vodní roztok NaCl	1100
Olej 18 $^{\circ}\text{C}$	~ 100

V rámci volby ochlazovacího média hrají důležitou roli tzv. C-křivky, které se uplatňují při volbě kritické rychlosti ochlazování v_k – nejmenší rychlost ochlazování, během které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku (viz obr 4.7) [23].



Obr. 4.7 C-křivky vybraných hliníkových slitin, v_k představuje kritickou rychlost ochlazování [23]

Stárnutí

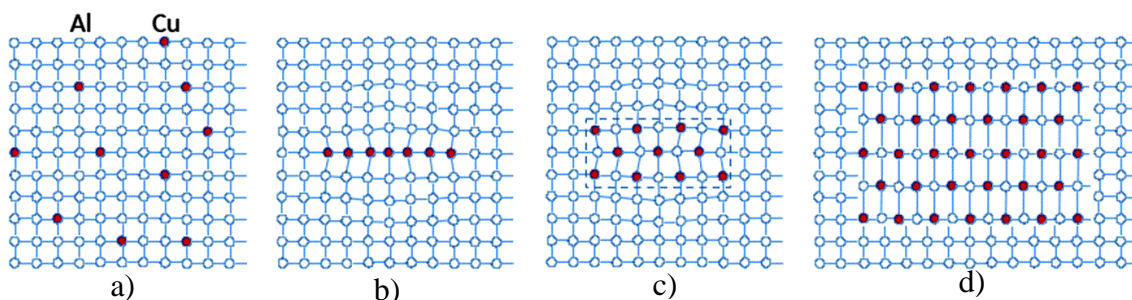
Stárnutím (neboli precipitačním vytvrzováním) se označuje proces, při kterém dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})'$. Přísadový prvek difunduje do oblastí s větším obsahem této přísady a dochází k nukleaci nové fáze. Podle vytvrditelného přísadového prvku pak mohou vznikat např. fáze: [17]

- u slitiny Al-Cu fáze CuAl_2
- Al-Mg-Si – fáze Mg_2Si
- Al-Mg-Zn – fáze Mg_2Zn

Následným růstem těchto fází dochází ke vzniku tzv. koherentních precipitátů, které se označují jako Guinier-Prestonovy (GP) zóny. Tyto zóny jsou destičkovitého tvaru a dosahují tloušťky 10^{-9} – 10^{-10} m. Parametry krystalové mřížky GP jsou podobné s parametry mřížky matrice. U částic s koherentním a semi-koherentním rozhraním je precipitační vytvrzování umožněno díky tzv. protínacímu mechanismu. Dislokace může při skluzu projít díky návaznosti krystalových mřížek, přičemž protnutá částice zvýší svůj objem a stává se tak větší překážkou pro další dislokaci. Tímto způsobem je třeba zvyšovat energii k překonání a vytváří se tak vnitřní pnutí soustavy, čímž dochází k vytvrzování.

Postupem času dochází k většímu shlukování těchto částic, se ztrácí a dává tak vzniknout přechodnému precipitátu (semi-koherentní fáze). Z části si vytváří samostatné útvary, které již nejsou propojeny s počáteční maticí. Vytváření koherentních a semi-koherentních (GP) fází má pozitivní vliv na zvýšení pevnosti na úkor tažnosti, která je kvůli deformaci jednotlivých krystalových mřížek omezená.

Posledním stádiem vytvrzování se nazývá přestárnutí. Dochází k postupné ztrátě koherence. Důvodem přestárnutí je působení příliš vysoké teploty, nebo dlouhé doby vytvrzování. Přisadový prvek se začíná vylučovat jako rovnovážná fáze a dochází k postupné ztrátě pevnosti a tvrdosti na téměř původní hodnotu, které materiál dosahoval před TZ. V technické praxi se občas můžeme setkat s lehce přestárlými slitinami, právě z důvodu zvýšené tažnosti na úkor snížené pevnosti [3, 5, 23].



Obr. 4.8 Vyloučení precipitační fáze, a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) semi-koherentní precipitát (přechodný), d) nekoherentní precipitát [25]

K precipitačnímu vytvrzování hliníkových slitin může docházet již za pokojové teploty – *přirozené stárnutí*, nebo za zvýšené teploty – *umělé stárnutí*.

Typickým představitelem pro umělé stárnutí jsou slitiny Al-Mg a Al-Si-Mg. Teplota vytvrzování se nejčastěji volí mezi 140–180 °C po dobu 3 až 8 hodin. Platí, že při zvýšené teplotě je nutnost zkrátit dobu stárnutí, protože dříve dosáhnou svého maxima [3].

U slitin s přirozeným stárnutím dochází k samovolnému vytvrzování. Nejčastěji se jedná o slitiny typu AlZnMg a AlCu4. Stárnutí probíhá pomalu, finálních vlastností dosáhne slitina až po více než 100 hodinách. Proto norma předepisuje provádět měření mechanických vlastností až po 8 dnech vytvrzování [3].

4.3 Tepelné zpracování vybraných slitin hliníku

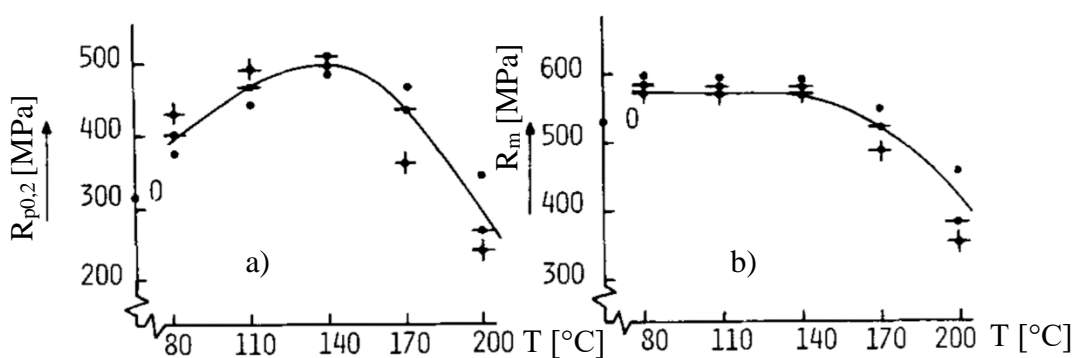
4.3.1 Slitina EN AW-7075

Vysokopevnostní slitina typu Al-Zn-Cu-Mg má široké uplatnění především v leteckém průmyslu. Oblíbená je především díky výborné pevnosti způsobené možností precipitačního vytvrzování intermetalickou fází MgZn_2 . Precipitační vytvrzování probíhá v následujícím sledu:

Přesycený tuhý roztok \rightarrow GP zóny \rightarrow přechodný precipitát \rightarrow rovnovážný precipitát

Zpravidla se slitina tepelně upravuje pro co nejvyšší pevnost²⁶, nicméně v tomto stavu materiál podléhá korozi pod napětím. Proto se někdy volí TZ s umělým přestárnutím (T73), což sice sníží hodnotu pevnosti, ale zvýší se odolnost vůči křehkému lomu.

Komerčně vyráběná slitina 7075 průměrně obsahuje 5,5 % Zn, 2,46 % Mg, 1,6 % Cu, 0,21 % Cr, 0,27 % Fe, 0,16 % Si a 0,05 % Mn. Tepelné zpracování se skládá z rozpouštěcího žíhání na teplotě 465 °C po dobu 1 h. Poté následuje rychlé ochlazování do vody o pokojové teplotě. Bylo zjištěno, že nejlepší kombinace pevnosti a lomové houževnatosti se docílí umělým stárnutím pod teplotou 140 °C [26].



Obr. 4.9 Diagram závislosti a) $R_{p0,2}$ b) R_m materiálu EN AW-7075 na teplotě stárnutí [26]

4.3.2 Slitina EN AW-3103

Tepelně nevytvrditelná slitina disponuje velmi dobrou odolností vůči korozi, vhodná ke svařování a ohýbání. V rovnovážném stavu se ve struktuře nachází intermetalické fáze $(\text{FeMn})_3\text{SiAl}_{15}$ a $(\text{FeMn})\text{Al}_6$. U tohoto typu slitin dochází ke vzniku nerovnovážné struktury již při krystalizaci. Proto je nutnost podrobit odlitky homogenizaci. Ta se nejčastěji uskutečňuje v rozmezí 570–620 °C a následným pozvolným ochlazováním na teplotu 370–400 °C. V případě rekrystalizačního žíhání se volí teplota v rozmezí 330–380 °C. Nejčastěji se tato slitina zpracovává na plechy a pláty [23].

²⁶ Označení TZ T6 (viz příloha)

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zpracování přehledu o jednotlivých typech hliníkových slitin a zhodnocení jejich druhů tepelného zpracování. Slitiny se mohou dělit z několika hledisek. Nejprve z pohledu technologie výroby, na slitiny ke tváření, a nebo jako slévárenské slitiny k dalšímu odlévání. Rozdíl mezi nimi je především v obsahu přísadového prvku, kde se u tvářené litiny požaduje mnohem větší podíl plastického tuhého roztoku.

Dalším rozdělovacím kritériem mezi jednotlivými slitinami může být schopnost precipitačního vytvrzování. Mezi skupiny tepelně nevytvrditelných slitin patří, kromě kategorie technicky čistého hliníku, také binární slitiny Al-Mn a Al-Mg. Zvýšit mechanické vlastnosti můžou jen pomocí deformace nebo pomocí zpevňování tuhého roztoku. Svoji nízkou pevnost kompenzují vynikajícími plastickými vlastnostmi a odolností vůči atmosférické korozi. Speciální skupinou nevytvrditelných slitin jsou tzv. siluminy. Jedná se o nejrozšířenější hliníkovou slitinu pro odlitky, exceluje svými slévárenskými vlastnostmi, především v oblasti eutektika.

Slitiny vytvrditelné mohou zvýšit své mechanické vlastnosti již zmiňovaným precipitačním vytvrzováním. Nevýhodou tohoto typu TZ je ztráta části plastických vlastností a větší náchylnost ke křehkému lomu.

Odlitky tvořené tlakovým litím se ve většině případů používají již v litém stavu, neboť jejich struktura již zaznamenává určitou část homogenity a TZ nevykazuje takových výsledků. Oproti tomu odlitky lité gravitačně nebo do pískové formy, se díky segregaci jednotlivých částic a hrubé struktury, tepelně zpracovávají na požadované vlastnosti.

Snaha lidstva spočívá ve vynalezení univerzální slitiny na veškeré použití. To však není úplně možné, proto stále je nutné zapřemýšlet nad jednotlivými použitími dané slitiny a brát v potaz její silné i slabé stránky.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Primary aluminium production, 2019. World aluminium [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.world-aluminium.org/statistics/>
- [2] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ, 2014. Neželezné kovy. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [3] ROUČKA, Jaromír, 2004. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2790-6.
- [4] PAWŁOWSKI, Lech a Philippe BLANCHART, 2018. Industrial chemistry of oxides for emerging applications [online]. Hoboken, NJ: John Wiley [cit. 2019-04-28]. ISBN 978-1-119-42362-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpICOEA00N/industrial-chemistry/industrial-chemistry>
- [5] VOJTĚCH, Dalibor, 2006. Kovové materiály. Dotisk 1. vyd. Praha: VŠCHT. ISBN 978-80-7080-600-5.
- [6] POLMEAR, I. J., Jian-Feng NIE, Ma QIAN a David STJOHN, [2017]. Light alloys: metallurgy of the light metals [online]. Fifth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier [cit. 2019-04-28]. ISBN 978-0-08-099431-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpLAMLME01/light-alloys-metallurgy/light-alloys-metallurgy>
- [7] HOVORKA, František, 2005. Technologie chemických látek. Praha: Vydavatelství VŠCHT. ISBN 80-708-0588-9.
- [8] MAZUMDER, B. a B.K. MISHRA, 2011. Managing Wastes from Aluminum Smelter Plants [online]. India: Woodhead Publishing [cit. 2019-04-30]. ISBN 978-0-85709-010-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMWASP003/managing-wastes-from/managing-wastes-from>
- [9] The International Annealed Copper Standard, NDT Resource Center [online]. [cit. 2019-05-2]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/GeneralResources/IACS/IACS.htm>
- [10] PTÁČEK, Luděk, 2002. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM. ISBN 80-720-4248-3.
- [11] SEDLÁČEK, Vladimír. Neželezné kovy a slitiny. 1.vyd., Praha, SNTL, 1979. 398 s.
- [12] Rolled Products for packaging [online], In: . [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.hydro.com/en/products-and-services/rolled-products/rolled-products-for-packaging/>
- [13] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA, 2011. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [14] LAŠTOVICA, Petr, 2012. Použití hliníku a jeho slitin ve slévárenství [online]. Brno [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54581. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.

- [15] CAMPBELL, F. C., c2008. Elements of metallurgy and engineering alloys [online]. Materials Park, Ohio: ASM International [cit. 2019-05-5]. ISBN 978-0-87170-867-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEMEA000U/elements-metallurgy-engineering/elements-metallurgy-engineering>
- [16] KAUFMAN, J. G., 2000. Introduction to aluminum alloys and tempers [online]. Materials Park, OH: ASM International [cit. 2019-05-7]. ISBN 978-0-87170-689-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIAAT0002/introduction-aluminum/introduction-aluminum>
- [17] Ageing of Alloys and Precipitation, Engineering Notes [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.engineeringenotes.com/metallurgy/alloys/ageing-of-alloys-and-precipitation-age-hardening-metallurgy/26856>
- [18] Koroze, Alunet [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/koroze>
- [19] PEŠEK, Jakub, 2013. Vlivu metalurgických a technologických parametrů na mechanické vlastnosti slitin hliníku [online]. Brno [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67410. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [20] CAMPBELL, John, 2011. Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design [online]. Waltham, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann [cit. 2019-05-15]. ISBN 978-1-85617-809-9. Dostupné z: <https://app.knovel.c21om/hotlink/toc/id:kpCCHMCPM1/complete-casting-handbook/complete-casting-handbook>
- [21] FAYOMI, Ojo Sunday Isaac, Abimbola Patricia Idowu POPOOLA a Nduka Ekene UDOYE, 2017. Effect of Alloying Element on the Integrity and Functionality of Aluminium-Based Alloy. Aluminium Alloys - Recent Trends in Processing, Characterization, Mechanical Behavior and Applications [online]. InTech, 2017-12-21 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.5772/intechopen.71399. ISBN 978-953-51-3697-2. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-recent-trends-in-processing-characterization-mechanical-behavior-and-applications/effect-of-alloying-element-on-the-integrity-and-functionality-of-aluminium-based-alloy>
- [22] C. ROBLES-HERNANDEZ, Francisco, Robert MACKAY a Jose M. H. RAMIRÉZ, 2017. Al-Si alloys [online]. New York, NY: Springer Science Business Media [cit. 2019-05-16]. ISBN 978-331-9583-792. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-58380-8>
- [23] MICHNA, Štefan, 2005. Encyklopedie hliníku. Děčín: Alcan Děčín Extrusions. ISBN 80-890-4188-4.
- [24] Tepelné zpracování, In: Alunet [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani>
- [25] GORNOSTYREV, Yu. N. a M. I. KATSNELSON, 2015. Misfit stabilized embedded nanoparticles in metallic alloys. Physical Chemistry Chemical Physics [online]. 17(41), 27249-27257 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1039/C5CP04641F. ISSN 1463-9076. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5CP04641F>

- [26] The heat treatment of the commercial aluminium alloy 7075, 1979. 1(2.). ISSN
ISSN 0190-9177/79/1203-0003500.75/0.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Význam
FCC	face-centered cubic
GP	Guinier-Prestonova (zóna)
IACS	International Annealed Cooper Standart
TZ	tepelné zpracování

Symbol	Rozměr	Veličina
a	[nm]	parametr mřížky
A	[%]	tažnost
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
K	[–]	koordinační číslo
R _m	[MPa]	mez pevnosti
R _{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
t	[min]	čas
T	[°C]	teplota

8 PŘÍLOHA

8.1 Označování stavů tepelného zpracování hliníku a jeho slitin

Ve většině případů se za číselným označením uvádí, po jakém stavu tepelného zpracování se materiál nachází. Přehled nejběžnějších označení TZ je uveden v tab. 8.1.

Tab. 8.1 Označování stavů dle ČSN EN 515 [23]

Stav	Definice
F	Z výroby, bez mechanických specifikací
O1	Žháno na vysoké teplotě s pomalým ochlazováním
O2	Po tepelně-mechanickém zpracování za účelem zvýšení tvárnosti
O3	homogenizovaný
H12	Deformačně zpevněný – ¼ tvrdý
H14	Deformačně zpevněný – ½ tvrdý
H16	Deformačně zpevněný – ¾ tvrdý
H18	Deformačně zpevněný – plně zpevněný
H19	Deformačně zpevněný – velmi tvrdý
H22	Deformačně zpevněný a částečně žháný – ¼ tvrdý
H32	Deformačně zpevněný a stabilizovaný – ¼ tvrdý
W	Po rozpouštěcím žháním
T1	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí
T3	Po rozpouštěcím žháním, tváření za studena a přirozeném stárnutí
T4	Po rozpouštěcím žháním a přirozeném stárnutí
T5	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a umělém stárnutí
T6	Po rozpouštěcím žháním a umělém stárnutí
T7	Po rozpouštěcím žháním a umělém přestárnutí
T8	Po rozpouštěcím žháním, tváření za studena a umělém stárnutí
T9	Po rozpouštěcím žháním, umělém stárnutí a tváření za studena